

《論文》

気象用静止衛星からの画像のマッピング手法*

柏岡誠治** 山本真司** 江尻正員** 村山信彦***

Abstract

In analysing pictures from a Geo-stationary Meteorological Satellite, one of the most important processes is obtaining precise relations between the earth points and their corresponding locations in the pictures.

This paper deals with a new mapping algorithm to relate these locations, which is developed for a high-precision wind vector analysis in the future Global Atmospheric Research Program.

This algorithm originates from the analysis on deviations of position and attitude of the satellite, and includes these deviations as time-varying parameters. As a result, it becomes possible to analyse pictures precisely by taking into consideration even the time variation of the satellite position and attitude within the acquisition time of a single picture, which may be caused by the differences of scanning time. Also, it is possible to predict the mapping relations between pictures and the earth for a few hours in advance.

1. まえがき

現在、世界で計5個の静止衛星を打上げて全地球同時観測および広域気象通報を行なう GARP 計画****が推進されている。日本は1976年頃、静止気象衛星GMS*****を打上げ、東経140°を中心とする領域を担当する予定である。このGMSを地上の専用データ処理センターとオンラインで結び、ここで衛星の管制、データ通信処理とともに、地球の可視・赤外面画像の処理を行なう。とくに可視画像は約15000×15000の絵素からなり、一画像あたり220Mbyteの情報量を持ち、さらに赤外面画像と合わせて多目的に利用するため、現在における最大級の処理能力を持った計算機システムを必要とする。

画像処理でのもっとも重要な処理として風解析がある^{2),3)}。これは画像中から有効な雲を検出し、30分程

の間隔で得られる複数の画像間でのその雲の移動から、風向風速を推定するものである。2次元相関演算や雲の検出などの画像処理計算だけでなく、画像中での位置と地球表面での位置との対応関係を精密に求めるマッピング計算^{4),5)}が必須である。

本論文は、このマッピングの計算アルゴリズムについて述べたものである。従来は使用する画像の分解能が一桁低くオフライン処理であるため、精密なアルゴリズムが試みられなかった。ここで提案する方法は、地球の球面による歪み、衛星の走査機構、衛星の公転による位置・姿勢の変動についての解析をもとにしたものであり、時間パラメーターの導入によって、画像1枚の中でのスキャン時刻差による位置・姿勢の変動に対処でき、また数時間先までの任意点のマッピング関係を予測できるという、従来になかった特長を生み出したものである。

2. マッピングアルゴリズム

2.1 従来の方法との比較

GMSの画像中における雲の移動は、風速1m/secに対し30分間で2絵素程度になると計算される。ところが衛星の軌道・姿勢のずれによって、画像中における地球も移動し、その量は風による雲の移動量と同

* A Mapping Algorithm for Analysing Pictures from Geo-stationary Meteorological Satellite, by Seiji Kashioka, Shinji Yamamoto, Masakazu Ejiri (Central Research Laboratory, Hitachi, Ltd.) and Nobuhiko Murayama (Meteorological Research Institute).

** (株)日立製作所 中央研究所

*** 気象研究所

**** Global Atmospheric Research Program (地球大気開発計画)

***** Geo-stationary Meteorological Satellite

等あるいはそれ以上である。そのため、衛星画像による風計算が始まって以来、この画像中の地球の移動を消去する試みが種々行われてきた。従来の方法は、このずれの原因の解析から計算を行わず、2枚の画像を合わせるといふ意味で、まず画像中の地球外周の円を合わせ⁵⁾、その他に後述するランドマーク・マッチング⁶⁾によって回転や引伸ばし、圧縮などを加え重ね合わせようとするものであった。過去に用いられてきた衛星画像のように分解能が低い(たとえば 2400 × 8192) ものでは、このような方法で一応の目的は達成できた。しかし画像中の地球のずれは複雑で上記のような方法では全面面にわたってずれを消去するのは困難である。これに対しここで述べる方法は、主要なずれ原因の解析から任意の画像点と地球上の位置の対応を正確に計算できる特徴がある。

一方、地球との対応が固定された基準画面*を考え、入力した画像の全絵素をまずこの基準画面に移してから、風計算などの処理を行なう方法が考えられる。その後の計算や画像の記録保存の上でのメリットはあるが、GMS の場合、全絵素を移し換えることは長大な時間を要し、日常業務として行なうことは困難である。ここで提案する方法は、このような基準画面への変換を避け、必要な点のみマッピング計算を行なう方法である。

2.2 衛星の位置・姿勢

人工衛星は地球の周囲を公転している。その軌道が真円かつ赤道面と一致し、その周期が地球自転と等しいときのみ真の静止衛星となる。しかし、打上げ誤差、摂動の影響等によって、軌道に誤差が生じるのは防げない。その結果、衛星は静止しない。すなわち衛星直下の点は移動する。とくに軌道が傾斜すると、衛星直下点は1日周期で南北に長い8の字を描いて移動する(図5参照)。この直下点の移動量を図1の関係から求めると次のようになる⁷⁾。衛星公転と地球自転の角速度をそれぞれ ω_s, ω_e とし、昇交点 A の通過時刻を t_1 とする。赤道座標系で時刻 t の衛星の緯度(赤緯) α は次の式で表わされる。

$$\sin \alpha = \sin \lambda_1 \sin \omega_s(t - t_1) \tag{1}$$

衛星と昇交点の赤経の差 θ は次の式のようになる。

$$\sin \theta = \cos \lambda_1 \sin \omega_s(t - t_1) / \cos \alpha \tag{2}$$

一方地球もこの時間に自転しているので直下点の経度の変化 β は

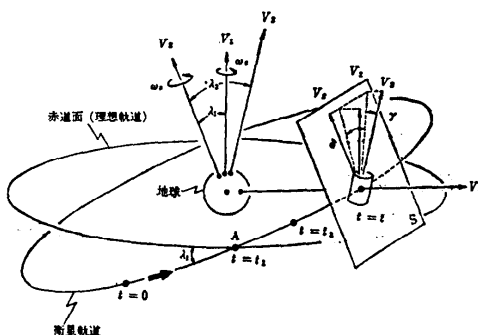


Fig. 1 Parameters of a geo-synchronous satellite

$$\beta = \theta - \omega_e(t - t_1) \tag{3}$$

で表わされる。

GMS は 100 RPM で自転する。この自転軸 V_3 が図のように地球軸 V_1 、軌道軸 V_2 と方向が一致していないと、 V_3 が空間的に固定であっても、衛星の公転のため地球からみるとコマのように首を振るように見える。後述のように画像はこの自転によって得られるのでこの首振りの影響を大きく受ける。地球の中心から直下点を経て衛星に向かうベクトル V_4 を位置ベクトルと呼ぶ。 V_4 に垂直な平面 S を考える。 S と自転軸 V_3 とのなす角 γ をピッチと呼ぶ。もしピッチが0でないなら画像は南北方向にずれる。 V_1, V_3 を S 面に投影したとき、両者がなす角 δ をヨウといい、ヨウが0でないとき北極南極方向と映像の上下方向とは一致せず傾くことになる。

ピッチが負から正に変化する時刻を t_2 とし、 V_2, V_3 のなす角を λ_2 とし、ピッチ γ とヨウ δ を求めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \sin \gamma &= \sin \lambda_2 \sin \omega_s(t - t_2), \\ \tan \delta_1 &= \tan \lambda_2 \cos \omega_s(t - t_2), \\ \tan \delta_2 &= \tan \lambda_1 \cos \omega_s(t - t_1), \\ \delta &= \delta_1 - \delta_2. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

ただし δ_1, δ_2 はそれぞれ V_3, V_1 を投影したときの S 平面内の V_2 との角である。

以上で衛星の公転によるずれの量が、時刻 t の関数として求まった。

2.3 マッピング計算

量子化された画像中の位置を示す (i, j) インデックスからその点に映っている地球上の点の緯度、経度 (ϕ, θ) を求める計算を M 変換と呼ぶことにする。まず最初に衛星の画像データを得る機構が関係する。図2は GMS の画像を得る機構を示したものである。

*メルカトル図や衛星が理想的な位置・姿勢にあるとしたときの画像など

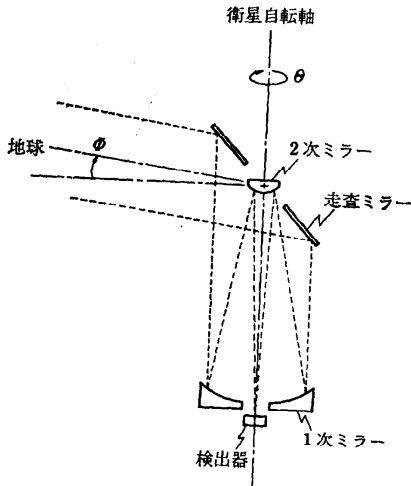


Fig. 2 Basic mechanism of a spin scan radiometer for GMS

1次・2次反射鏡からなる望遠鏡の焦点に置かれた検出器により、地球からの放射光量が光電変換のあとAD変換され、地上無線局を通じてデータ処理センターに送り込まれる。

垂直スキャンは望遠鏡に光を取込むための走査ミラーの向きを変化させて行ない、水平スキャンは衛星自身の回転を用いる。視線の方向を極座標 (ϕ, θ) で表わすと画像インデックスと次の関係がある。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \phi_0 - i \cdot \Delta\phi, \\ \theta &= \theta_0 + j \cdot \Delta\theta. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 ϕ_0, θ_0 はスキャンのスタート角、 $\Delta\phi, \Delta\theta$ はスキャン間隔である。この極座標を直交座標に変換し、視線方向の単位ベクトル $E_1 = X_1/|X_1|$ を求める。

$$E_1 = \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ \zeta_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\theta \\ \cos\phi \sin\theta \\ \sin\phi \end{pmatrix} \quad (6)$$

さらに、ピッチ γ とヨー δ に対する補正を回転行列 R_1 で行ない $E_2 = X_2/|X_2|$ を得る。

$$E_2 = \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \\ \zeta_2 \end{pmatrix} = R_1 E_1$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta & \sin\delta \\ 0 & -\sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_1 \\ \eta_1 \\ \zeta_1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

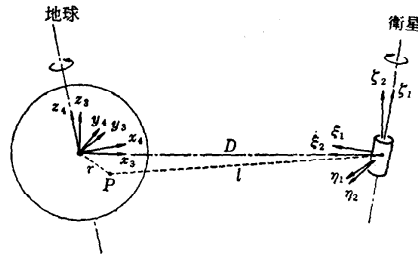


Fig. 3 Coordinate system for M -transformation

次に図3に示すごとく、視線が衛星から l だけ伸びて地球上の点 P にあたるとする。地球を中心とする座標系での P 点の座標 (x_3, y_3, z_3) には、

$$x_3^2 + y_3^2 + z_3^2 = r^2, \\ X_3 = \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -l & 0 & 0 \\ 0 & -l & 0 \\ 0 & 0 & l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \xi_2 \\ \eta_2 \\ \zeta_2 \end{pmatrix} \quad (8)$$

の関係がある。これを解くと X_3 が求まる。

次に直下点の緯度、経度の補正を回転行列 R_2 で行ない X_4 を得る。

$$X_4 = \begin{pmatrix} x_4 \\ y_4 \\ z_4 \end{pmatrix} = R_2 X_3 \\ = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} \quad (9)$$

X_4 座標は地球に固定された直交座標である。これを極座標に変換し次式により緯度 ϕ 、経度 θ を得る。

$$\left. \begin{aligned} \tan\phi &= z_4 / \sqrt{x_4^2 + y_4^2}, \\ \tan(\theta - \theta_0) &= y_4 / x_4. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで θ_0 は昇交点直下点の経度である。

逆に、緯度、経度 (ϕ, θ) から画像インデックス (i, j) を求める変換を M^{-1} 変換と呼ぶ。まず ϕ, θ から(10)式、(9)式の逆の変換を行なって X_3 を求め、次に

$$X_2 = \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$X_1 = R_1^{-1} X_2 \quad (12)$$

によって、衛星中心の直交座標を求め、これを極座標に変換し、さらに(5)式の逆変換により i, j を求める。

以上の手順を整理すると図4のようになる。

M^{-1} 変換の応用例として、図5のように地球上の固

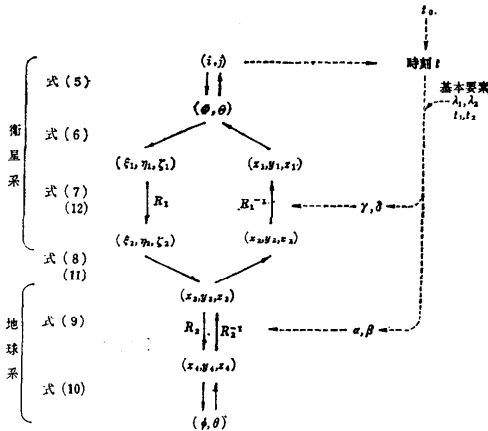


Fig. 4 M -and M^{-1} -transformation procedure

定点が衛星 1 公転の間に衛星画像中をどのように移動するかを求めることができる。これは基本要素を仮定して、 t を 24 時間変化させ各時間での位置・姿勢パラメータ $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ を計算し、この値を用いて注目点の緯度、経度から M^{-1} 変換を行ない、 t の変化による軌跡をプロットしたものである。また図 6 は 3 時間毎の画像における地球の変化を示したものである。

2.4 基本要素と時刻

M 変換、 M^{-1} 変換で回転行列 R_1, R_2 の中に位置・姿勢パラメータ $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ が含まれているが、これは 2.1 で示したように $t, \lambda_1, t_1, \lambda_2, t_2$ の関数である。

時刻 t はスキャンが行なわれる時刻で、同一水平スキャン内においては、同じとみなしてよく、垂直スキャン・スタート時刻 t_s と自転周期 Δt および i インデックスから求めることができる。

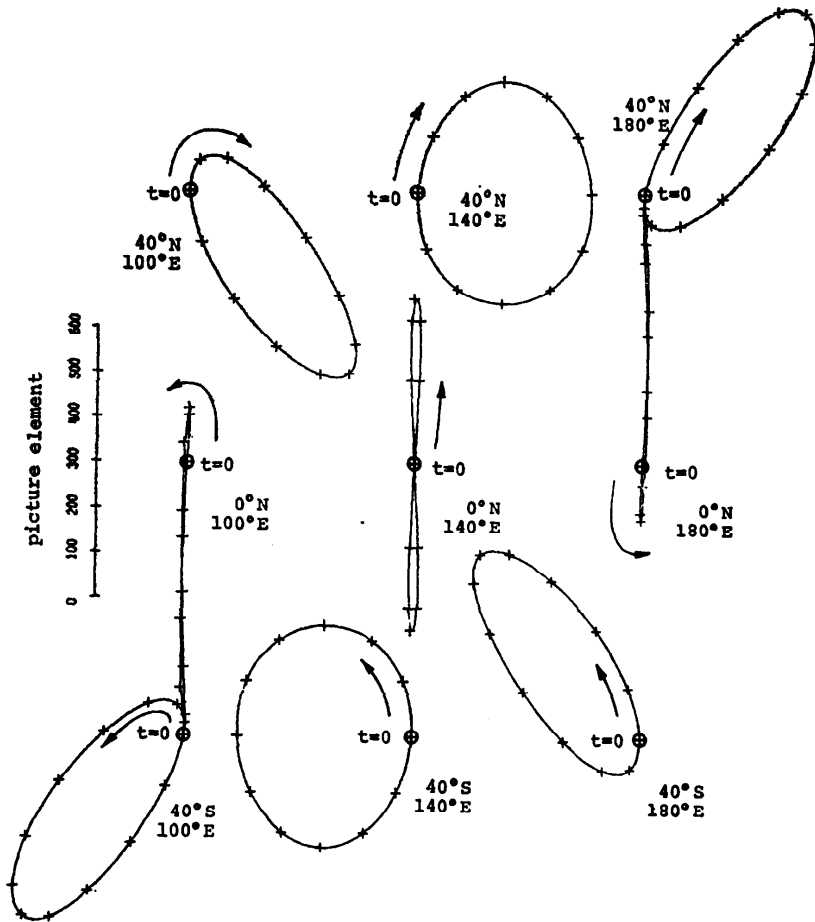


Fig. 5 24-hour trajectory of fixed earth points in a satellite picture ($\lambda_1=2.5^\circ, \lambda_2=0.0^\circ$ の例)

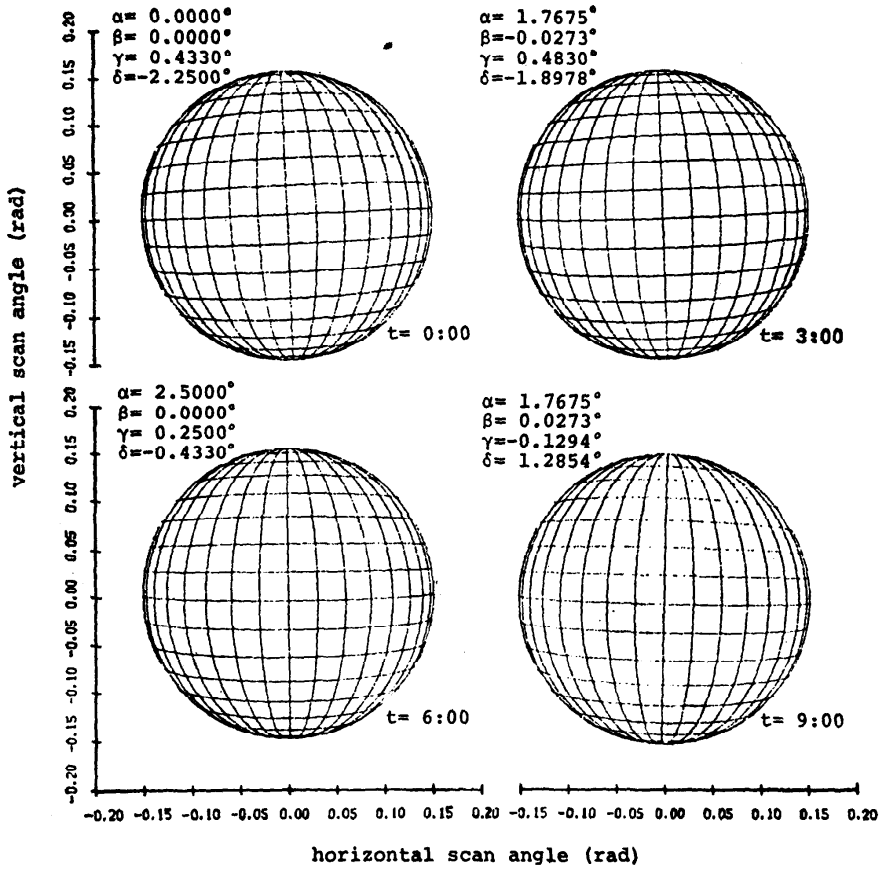


Fig. 6 Variation of views of the earth at every three hours ($\lambda_1=2.5^\circ, \lambda_2=0.5^\circ$ の例)

したがって $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ の4つを基本要素として持っておけば、任意の時刻の画像について、 M, M^{-1} 変換ができる。ところで λ_1, λ_2 は衛星の軌道から定まるが、固定的なものではなく摂動によって変化する。また λ_3, λ_4 は衛星自転軸の恒星系に対する向きから定まるが、これも歳差運動によって変化する。しかし、いずれの変化もゆるやかであることがいままでの衛星の経験から予測され、1枚の画像のスキャン時間については無視できるが、もっと長い時間単位については無視できなくなる。これらの変化については、特別の地上あるいは衛星内の測定手段によって測定する技術が開発されているが、得られる画像自身から測定することができ、とくに衛星自転軸の傾きに関しては、画像自身から求めるのがもっとも精度が高いとされてい

る。

2.5 ランドマークマッチング

基本要素の経時変化すなわち誤差を見出し、正しい基本要素を求めるための手段としてランドマークマッチングが利用できる。ランドマークとは、いつも地球上の一定地点に所在し、画像としてとり込んだとき特徴あるパターンとしてとらえられるものを指す。具体的には画像内で30サンプル四方程度のわん曲した海岸線、小さな島、山岳などを衛星の全視野の中から10~30個選び出し、その画像パターンとその中心の正確な所在点の経緯度を記憶しておく。この所在地上位置から、修正前の基本要素によって M^{-1} 変換を行なうと画像中の位置が予測される。この予測点の周辺で、あらかじめ記憶してあるランドマークのパターン

ともっともよく一致する点を見出す。これをランドマークマッチングと呼び相関計算などが用いられる。この結果求まった点と予測点とのずれが、基本要素の誤差を評価することになる。第 k 番目のランドマークの経緯度からあらかじめ求めてある X_k 座標を X_k^0 とし、画像中のインデックス i, j と時刻 t_k から M 変換によって求めた X_k 座標を X_k^1 とすると、両者の差の 2 乗を各ランドマークについて加算した次の式を評価関数とすることができる。

$$E = \sum_k (X_k^1 - X_k^0)^2 \quad (13)$$

この評価関数 E を最小にする基本要素を求めればよい。これを解析的に解くと複雑になるので現在保持している基本要素を出発値として、4 次元空間 $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$ での山登り法で最適点を探索する手法を用い、最適点での基本要素を新しい基本要素として更新記録することができる。この方法の特長は、従来のような画像の平行移動量や傾き補正值を求めようとするものではなく、軌道や衛星スピンの軸自身を決定しようとするものであるため、1 枚の画像のみでなく複数枚でのランドマークマッチングの結果を用いて基本要素を決定することができる点である。

3. マッピングアルゴリズムの応用

気象衛星に対してそれ専用の計算機を常にオンラインで結ぶシステムは世界的にも新しい試みといえる。そのため、画像処理の方式にも新しい可能性が生まれている。このことを念頭においていくつかの処理について考えてみる。

3.1 画像データの収録

GMS 衛星の画像データは 200 Mbyte を超し、主記憶装置に格納できる量ではない。そのためディスクメモリを用いるとすると、データ量が大きいため、ディスクとの転送回数をできるだけ少なくするように処理手順を考える必要がある。衛星から送られてくるデータは全画面をラインストレッチしたものであるが、風計算に必要なのは 2 次元的に切出した領域である。そこで受信時と計算時に必要なデータの並びが異なり、ディスクにおけるデータの並べ方によってアクセス回数、アクセスタイムが変わり、転送時間に大きな差がでてくる。雲の抽出や追跡などの処理は、原画像の 512×512 の 2 次元切出しエリアに対して行なうのが適当である。原画像データは受信の際、すでにコアでの配列を変え、さらに処理単位の切出しエリア 1 つが、磁気ディスクの連続したエリアに入るように記録

することができる。

風計算では連続して取込んだ 3 枚の画像を用いる方法が開発されている⁶⁾が、この場合処理単位の切出しエリアが地球上の同じエリアであることが望ましい。厳密には標準となる画像 (例えばメルカトル図法) を想定して原画像をその画像に変換し画像の 1 点毎に M 変換を行なう必要があるが、画像の点数を考えると時間的に無理である。そこで平行移動の分のみ補正し、エリア中心が同一地点となるようにするだけにとどめる方法が考えられる。この補正はデータ転送の範囲をシフトするのみで行なえるが、データ量が多いため、コア内での転送もさけ、受信データをコア内のバッファに格納する際に行なってしまうとよい。コアからディスクに転送するときには、すでにシフトされたデータを書込む。そのためにシフト量の計算はデータ受信が始まるより以前に行なっておく必要がある。

エリア中心点の配列は次のようにして決定する。3 枚目の画像は、風計算以外にも種々の目的に使用するため、この画面を 512×512 の処理エリアにすきまなく分割する。各エリアの中心に対応する地球上の点をスキャン予定時刻をもとに M 変換によって求める。この各地点に対応する 1 枚目、2 枚目のスキャン時刻での画像中の位置を M^{-1} 変換によって求め、その点を切出しエリアの中心とする。この場合、隣のエリアとの間ですきまや重なりが生じることになる。以上の計算にはその時点での基本要素を用いる。表 1 にこのようにして計算したエリア中心の例を示す。

3.2 風計算における変換

風ベクトルは画像中の雲の移動量から推定する。そ

Table 1 Examples of area partitioning

$\lambda_1=2.5^\circ, \lambda_2=0.5^\circ, t_1=7.00 \text{ a.m. JST}, t_2=11.00 \text{ a.m. JST}$
Scan start time of 3rd picture = 9.00 a.m. JST

| エリア番号 | エリア中心画像インデックス | | | | | | エリア中心地球座標 | | |
|-------|---------------|-------|----------|-------|----------|-------|-----------|--------|-------|
| | 第 1 フレーム | | 第 2 フレーム | | 第 3 フレーム | | 経度(°) | 緯度(°) | |
| | i_1 | j_1 | i_2 | j_2 | i_3 | j_3 | | | |
| 4 | 15 | 3,797 | 9,038 | 3,863 | 9,030 | 3,930 | 9,021 | 158.30 | 25.78 |
| 4 | 16 | 3,803 | 9,550 | 3,866 | 9,542 | 3,930 | 9,533 | 163.53 | 26.04 |
| 4 | 17 | 3,810 | 10,061 | 3,870 | 10,054 | 3,930 | 10,045 | 169.14 | 26.33 |
| 4 | 18 | 3,818 | 10,573 | 3,874 | 10,566 | 3,930 | 10,557 | 175.29 | 26.68 |
| 5 | 15 | 4,305 | 9,036 | 4,373 | 9,029 | 4,442 | 9,021 | 157.77 | 21.85 |
| 5 | 16 | 4,312 | 9,548 | 4,377 | 9,541 | 4,442 | 9,533 | 162.78 | 22.07 |
| 5 | 17 | 4,319 | 10,059 | 4,380 | 10,053 | 4,442 | 10,045 | 168.11 | 22.32 |
| 5 | 18 | 4,327 | 10,571 | 4,384 | 10,564 | 4,442 | 10,557 | 173.92 | 22.61 |
| 6 | 15 | 4,815 | 9,034 | 4,884 | 9,028 | 4,954 | 9,021 | 157.39 | 18.08 |
| 6 | 16 | 4,821 | 9,546 | 4,887 | 9,540 | 4,954 | 9,533 | 162.23 | 18.27 |
| 6 | 17 | 4,828 | 10,058 | 4,891 | 10,052 | 4,954 | 10,045 | 167.36 | 18.48 |
| 6 | 18 | 4,836 | 10,569 | 4,895 | 10,563 | 4,954 | 10,557 | 172.91 | 18.72 |
| 7 | 15 | 5,325 | 9,032 | 5,395 | 9,027 | 5,466 | 9,021 | 157.12 | 14.43 |
| 7 | 16 | 5,331 | 9,544 | 5,398 | 9,539 | 5,466 | 9,533 | 161.84 | 14.59 |
| 7 | 17 | 5,338 | 10,055 | 5,402 | 10,050 | 5,466 | 10,045 | 166.82 | 14.77 |
| 7 | 18 | 5,345 | 10,567 | 5,406 | 10,562 | 5,466 | 10,557 | 172.19 | 14.96 |

のためにまず切出しエリアの中から雲の追跡点を選び、別時刻の切出しエリアから追跡点の位置を画像処理の手法を用いて求める⁹⁾。この追跡点の移動を風ベクトルに変換するために2点の画像中の位置の差を出して、その値から計算しようとするすると種々の誤差が入りこむことに注意する必要がある。そこで追跡点の移動前後の全面像中でのインデックス i, j をもとに M 変換で地球上の点に移した後、その距離を求めるようにする。このとき、最新の画像でのランドマークマッチングをもとに計算した基本要素を使って計算する。このため、切出しエリア決定のさい生じた計算誤差、そのとき更新前の基本要素を用いたための誤差は風速値に全く影響を与えない。

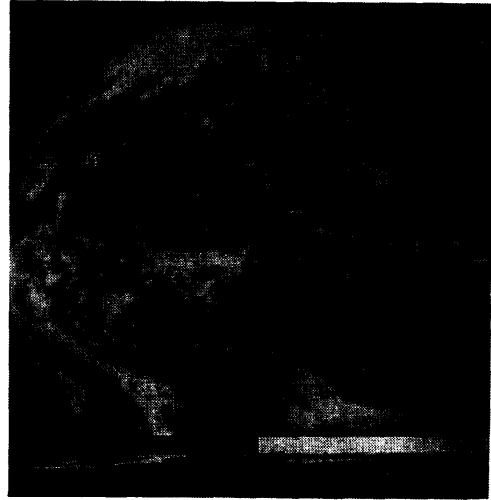
3.3 画像出力のための計算

画像中の位置を見やすくするために原画像の上に経緯線および地図を重ねてファクシミリに出力する必要がある。この計算は時刻毎に異なるため、その都度計算する必要がある。地図のデータは磁気テープなどに入れておき、これを M^{-1} 変換してプロットする。図7は原画像に重ねる地図グリッドの出力例である。

一方、原画像をメルカートル図法、ポーラステレオ図法に変換して、ファクシミリ用のデータに変換することも処理要件の1つである。変換後の図における等間隔格子を考え各図法の定義をもとに格子点の経度緯度を求める。この点を M^{-1} 変換で原画像インデックスに変換する。格子に囲まれた領域では格子点のインデックスをもとに内挿計算によって対応する原画像インデックスを求め、その位置の映像値を変換図に移



Fig. 7 Example of a grid and a map to overlay the original satellite picture



(a) original picture



(b) Mercator projection

Fig. 8 Picture transformation into a Mercator map

す。図8の(a)は原画像、(b)はこれを粗いメッシュ(原画像を 256×256 にサンプリングしたものを使用)でメルカートル図法に変換した例である。

4. まとめ

静止気象衛星の画像処理に必要とされる画像中の位置と地球表面での位置との間のマッピング計算の新しい方式を提案した。ここでは衛星の運用、画像の多面

的な利用にさいして必要とされる種々のマッピング計算を全て M 変換によって行なうように統一した。この場合衛星の公転によるマッピング関係の時間変化を導入することによって、計算精度の向上と、予測の可能性をうみだした。この長所は GMS 衛星画像のような高分解能のオンライン画像データによる風計算に威力を発揮し、これからの衛星画像処理に不可欠であると思われる。

おわりに本研究を進めるにあたり、種々御指導、御鞭達いただいた気象研究所、小平信彦部長、日立中央研究所渡辺宏所長、上妻冲副所長、沼倉俊郎部長に深甚の謝意を表わす。

参考文献

- 1) 日本気象学会編：気象研究ノート—気象衛星特集号, No. 111 (1972).
- 2) J. A. Leese, C. S. Novak & B. B. Clark: An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 10, No. 2, pp. 118~132 (1971).
- 3) R. M. Endlich, D. E. Wolf, D. J. Hall & A. E. Brain: Use of a pattern recognition technique for determining cloud motions from sequences of satellite photographs, *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 10, No. 2, pp. 105~117 (1971).
- 4) E. A. Smith & D. R. Phillips: Automated cloud tracking using precisely aligned digital ATS pictures, *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-21, No. 7, pp. 715~729 (1972).
- 5) C. L. Bristor: The earth location of geostationary satellite imagery, *Pattern Recognition*, Vol. 2, pp. 269~277 (Dec. 1970).
- 6) D. J. Hall, R. M. Endlich, D. E. Wolf & A. E. Brain: Objective methods for registering landmarks and determining cloud motion from satellite data, *IEEE Trans. on Computers*, Vol. C-21, No. 7, pp. 768~776 (1972).
- 7) L. F. Whitney: Effect of orbital inclination and spin axis attitude on wind estimates from photographs by geosynchronous satellites, *NOAA Technical Memo. NESS 41* (1972).
- 8) 山本, 柏岡, 江尻, 村山: 気象衛星画像からの風ベクトル演算アルゴリズム, *情報処理*, Vol. 15, No. 1, pp. 10~17 (1974).

(昭和48年10月29日受付)